

基于 Smith 预估器的模糊 PID 智能曲房环境 温湿度控制系统研究

杨海栗¹ 廖锡龙¹ 刘 赛² 胡新军^{1,3} 李 兰²
谢亮亮¹ 陈 珊² 费 磊¹

(1. 四川轻化工大学机械工程学院, 四川 宜宾 644000; 2. 固态发酵智能酿造技术安徽省重点实验室,
安徽 亳州 236800; 3. 四川省酿酒生物技术及应用重点实验室, 四川 宜宾 644000)

摘要: [目的] 解决大曲发酵过程强时滞、非线性难题。[方法] 提出 Smith 预估器与模糊 PID 协同控制策略。通过建立发酵过程数学模型, 利用 Smith 预估器补偿时滞, 结合模糊规则在线整定 PID 参数, 实现温湿度精准调控。[结果] 与传统 PID 控制和模糊 PID 相比, 温度方面超调量分别减少 23.3% 和 4.7%, 调节时间分别缩短 15.81% 和 11.53%, 湿度方面超调量分别减少 31.4% 和 5.7%, 调节时间分别缩短 34.57% 和 23.66%。[结论] 该方法与目标温湿度曲线温度最大偏差分别小于 2 °C 和 3% RH, 误差带稳定在 ± 1 °C 和 $\pm 2\%$ RH, 系统控制均匀且鲁棒性强。

关键词: 大曲发酵; 温湿度控制系统; Smith 预估器; 模糊 PID; Simulink 仿真

Intelligent temperature and humidity control system for Daqu fermentation rooms using Smith predictor-based fuzzy PID

YANG Haili¹ LIAO Xilong¹ LIU Sai² HU Xinjun^{1,3} LI Lan²
XIE Liangliang¹ CHEN Shan² FEI Lei¹

(1. School of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science and Engineering, Yibin, Sichuan 644000, China;

2. Anhui Province Key Laboratory of Intelligent Solid-state Fermentation Technology, Bozhou, Anhui 236800, China;

3. Liquor Brewing Biological Technology and Application of Key Laboratory of Sichuan Province, Yibin, Sichuan 644000, China)

Abstract: [Objective] To address the strong delay and nonlinearity in the Daqu fermentation process. [Methods] This study proposes a coordinated control strategy combining a Smith predictor and fuzzy proportional-integral-derivative (PID). By establishing a mathematical model of the fermentation process, the Smith predictor is used to compensate for the delay. Combined with fuzzy rules, the PID parameters are tuned online, achieving precise control of temperature and humidity. [Results] Compared with traditional and fuzzy PID control, the temperature overshoot is reduced by 23.3% and 4.7%, respectively, while the adjustment time is shortened by 15.81% and 11.53%, respectively. For humidity, the overshoot is reduced by 31.4% and 5.7%, while the adjustment time is shortened by 34.57% and 23.66%, respectively. [Conclusion] The proposed method ensures that the maximum deviation from the target temperature and humidity curves is less than 2 °C and 3% RH, respectively, with the error band stabilizing at ± 1 °C and $\pm 2\%$ RH. The system demonstrates uniform control performance and strong robustness.

基金项目: 四川省科技计划项目 (编号: 2023YFS0451); 安徽省智能固态发酵酿造技术重点实验室开放课题 (编号: GJ200020240429010); 四川省酿酒生物技术及应用重点实验室开放课题 (编号: NJ2022-08)

通信作者: 廖锡龙 (2000—), 男, 四川轻化工大学在读硕士研究生。E-mail: 18980734913@163.com

收稿日期: 2025-06-24 **改回日期:** 2025-11-25

引用格式: 杨海栗, 廖锡龙, 刘赛, 等. 基于 Smith 预估器的模糊 PID 智能曲房环境温湿度控制系统研究[J]. 食品与机械, 2026, 42(5): 97-106.

Citation: YANG Haili, LIAO Xilong, LIU Sai, et al. Intelligent temperature and humidity control system for Daqu fermentation rooms using Smith predictor-based fuzzy PID[J]. Food & Machinery, 2026, 42(5): 97-106.

Keywords: Daqu fermentation; temperature and humidity control system; Smith predictor; fuzzy PID; Simulink simulation

在白酒酿造过程中,大曲品质是影响最终成酒质量的关键因素,大曲发酵过程中温湿度环境对其影响非常重要^[1]。目前,酒厂主要采用人工检测曲房环境温湿度参数,通过人工经验决定是否进行开关窗户(通风和调节通风量)、多次翻曲和搭盖草帘等操作来调节曲房温湿度参数^[2]。这种人工控制方式检测频率低,数据真实性和准确度难以保证,无法精确控制。国内外众多学者正致力于智能化控制技术的研究,相关控制方法不断涌现且应用范围日益广泛^[3]。常见的控制方式涵盖传统控制、现代控制、智能控制以及解耦控制等,这些技术被广泛应用于温室大棚、动物养殖场、木材干燥、食品生产等诸多场景^[4-5]。

Hamidane 等^[6]提出了一种约束模型预测控制(CMPC)方法用作温室的温湿度控制,在约束下保证了温度($15^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{in}} \leq 30^{\circ}\text{C}$)和相对湿度($50\% \leq H_{\text{in}} \leq 70\%$)的调节。将其应用于风扇和加热器的控制信号 $u_r(0\text{ V} \leq u_r \leq 4.3\text{ V})$ 和 $u_h(0\text{ V} \leq u_h \leq 5\text{ V})$ 尊重硬约束概念,证明了 MPC 和跟踪任务的有效性。Agustianto 等^[7]使用模糊 PID 控制器,将传感器数据(温度和湿度)作为传感器阵列进行处理,多个传感器的读数测试结果显示准确率为 86%,可用于提高蘑菇种植的精度,从而实现生产效率并增加蘑菇产量。Furizal 等^[8]开发了一种模糊推理系统(FIS)和物联网(IoT)来控制室温和湿度的方法,在正常条件下,室温可以得到控制,平均变化为 -1.67°C ,总体平均温度为 25.95°C ,平均湿度为 80.16%。

刘洪朋等^[9]提出了一种基于模糊控制算法的智能化风筛系统,选择风速及其变化率作为输入变量,以舵机角度作为输出变量,通过模糊控制规则调节舵机角度,降低风筛超调。在玉米脱出物喂入量 3 kg/s ,风量 $<11.7\text{ m/s}$ 条件下,风筛达到杂质分离率 $>93\%$,无超调现象。刘向勇等^[10]提出了一种用于食品冷冻温度控制的模糊控制系统,当冷冻食品质量流量从 650 kg/h 增加到 700 kg/h 、驱动辊转速从 1.62 r/min 增加到 1.75 r/min 时,最终食品温度可快速恢复到约 -18°C ;食品入口发生 $+5^{\circ}\text{C}$ 的温度干扰时,模糊控制器动作,从而将食品的出口温度保持在预期值 -18°C 附近,实现输出变量的值不会在设定值附近出现大幅波动。

智能化的大曲发酵过程中由于加热系统与加湿系统存在的热量与湿度变化,导致大曲发酵温湿度控制系统存在滞后性和非线性特性^[11],上述提到的环境参数控制算法无法有效解决。研究拟针对大曲发酵温湿度控制非线性、准确性、时滞性问题,提出一种结合 Smith 预估器和

模糊 PID 的控制方法,该控制方法的核心优势在于其独特的双机制协同作用,Smith 预估器能够依据系统当前状态,提前预估系统在时滞影响下的未来响应^[12],将预估结果以超前反馈的形式传递给控制器,促使控制器提前做出精准动作,从而显著加速调节进程,大幅削减系统超调和振荡现象,使温湿度控制更加平稳、精准,有效解决发酵过程中因时滞引发的诸多问题。结合模糊 PID 控制^[13],能够实时监测温湿度偏差及其变化率,智能调整 PID 控制器参数。这种动态调整能力赋予控制系统极高的适应性,使其能够在不同发酵阶段、不同环境条件下,始终实现对湿度的精确控制,确保发酵过程始终处于理想状态,以为大曲发酵的高质量生产提供依据。

1 曲房发酵温湿度控制系统

该系统主要由执行设备系统和监测控制系统组成(见图 1)。系统以 PLC 为核心枢纽,通过传感器监测大曲发酵过程环境温湿度数据,将采集的数据上传给上位机,上位机接收并实时显示环境温湿度数据,根据监测的实时数据,上位机中 Smith-模糊 PID 控制器发送控制命令给硬件执行设备系统,执行设备通过由 PLC 传递的信号作出相应动作实时调整发酵过程实时温湿度与理想发酵条件下目标温湿度差值,使其实时温湿度曲线不断接近目标发酵温湿度。

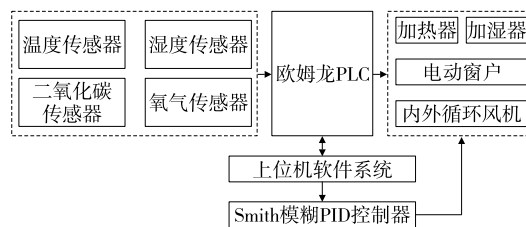


图 1 曲房控制系统结构

Figure 1 Structure of the Daqu fermentation room control system

1.1 曲房硬件设施

曲房硬件主要由曲房主体结构、曲房内外循环系统的管道、执行设备(加热器、加湿器、风机、电动窗户)、放置曲块的曲架组成。曲房的主体结构为钢架结构的双层玻璃房,曲房内外循环系统的管道及各类控制阀围绕曲房外墙面左右安装,并在曲房的左右侧面设置 4 个进出风口,曲房前后共设置 5 个电动门窗,加湿器、加热器分别安装在曲房前后。

加热器、管道、风机等主要执行大曲发酵升温过程,管道内气体经加热器加热后由调节电动阀调节气量,由

开关电动阀调节热气通路,8个曲房孔板可独立完成进出控制。

加湿器、管道、风机等主要执行大曲发酵加湿过程,加湿器将液态水雾化水分子颗粒,雾化后的水分子颗粒在风机的作用下流向输送管道,接着由输送管道流向加湿管道中,最终水分子通过加湿管道上的喷孔实现对曲房环境加湿,加湿管道呈横向两侧对称分布,且排列着直径一致的喷孔。加湿系统可调节曲房中的环境湿度上升。

曲房硬件设备相互配合实现大曲发酵过程的环境加热、降温、加湿、排潮降湿、O₂与CO₂浓度调节等作用。

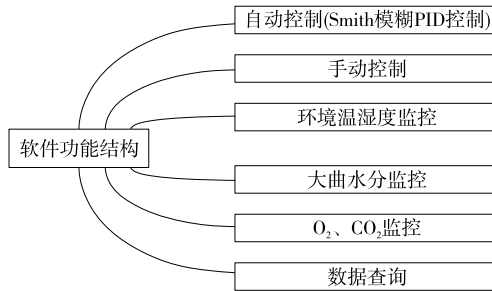


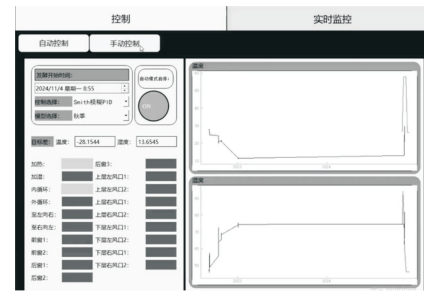
图2 软件结构功能设计及操作界面

Figure 2 Software architecture, functional design, and operation interface

1.2 曲房软件监测控制系统

曲房软件监测控制系统主要由上位机软件、欧姆龙 PLC、若干传感器构成。各类传感器采集发酵过程实时数据传送给 PLC,通过数据监测软件 KepServerEX 将 PLC 中数据发送至上位机软件的 Smith-模糊 PID 控制器,上位机软件再对其进行数据轮巡读取,Smith-模糊 PID 控制器对欧姆龙 PLC 发送控制指令,进而上位机软件结合 PLC 完成了对大曲发酵时的数据可视化、现场控制、自动控制和智能控制,实现大曲发酵过程的环境温湿度智能调控。

上位机软件功能结构及操作界面如图 2 所示,包括控制界面、实时监测界面和数据查询界面。



1.3 温湿度控制数字模型建立

根据曲房系统各部分的运动机理进行分析^[14],基于已掌握的各类设备信息再结合物理定律分别列出相应的方程,由此建立温湿度模型。

(1) 温度模型:根据热力学第一定律,大曲发酵时可以得到

$$Q = Q_{\text{Heart}} - Q_{\text{Transfer}} + Q_{\text{Other}} - Q_{\text{Hum}}, \quad (1)$$

式中:

Q ——曲房内热量的变化量, J;

Q_{Heart} ——加热器开启所产生的热量, J;

Q_{Transfer} ——曲房内外热传递所产生的能量, J;

Q_{Hum} ——加湿水蒸气汽化所吸收的热量, J;

Q_{Other} ——额外因素热量损失, J。

系统需要使用加热器进行加热,因此需要计算加热器所产生的热量,整理后得到:

$$Q_{\text{Heart}} = \frac{C_p \times m \times P \times \eta_1 \times 3\,000}{L}, \quad (2)$$

式中:

$\bar{t}$ ——增加温度, °C;

C_p ——曲房中空气比热容, kg·K;

m ——加热物体质量, kg;

P ——加热器功率, kW;

η_1 ——加热器热效率,一般取 85%;

L ——加热送风量, m³/h。

曲房内外热传递所产生的能量,即系统在使用风机和开窗产生的热量变化。风机吹风热量和开窗热量计算式为:

$$Q_{\text{Transfer}_{oc}} = \rho C_p \varphi_{oc} (\tilde{T}), \quad (3)$$

$$Q_{\text{Transfer}_{wd}} = \rho C_p \varphi_{wd} (\tilde{T}), \quad (4)$$

式中:

$Q_{\text{Transfer}_{oc}}$ ——风机吹风产生的热量变化, J;

$Q_{\text{Transfer}_{wd}}$ ——开窗产生的热量交换, J;

$\tilde{T}$ ——曲房内温度与外界温度的偏差, °C;

ρ ——外界空气密度, kg/m³;

C_p ——空气定压比热容, kg·K;

φ_{oc} ——风机吹风通风量, m³/s;

φ_{wd} ——开窗通风量, m³/s。

系统的加湿器产生的水蒸气会带走热量,计算式为:

$$Q_{\text{Hum}} = r \times E_{\text{humi}}, \quad (5)$$

式中:

r ——水的汽化潜热, J/kg;

E_{humi} ——加湿水蒸气的质量, kg。

整理后可得:

$$Q = \frac{C_p \times m \times P \times \eta_1 \times 3\,000}{L} - \rho C_p [\varphi_{oc}(\tilde{T}) + \varphi_{wd}(\tilde{T})] - r \times E_{humi} - Q_{Other}, \quad (6)$$

且 Q 的计算式为:

$$Q = V \times \rho \times C_p \frac{dT}{t}, \quad (7)$$

最终得到曲房的温度能量平衡方程:

$$\bar{T}(t) = \frac{C_p \times m \times P \times \eta_1 \times 3\,000}{L \times V \times \rho} - \frac{\varphi_{oc}(\tilde{T}) + \varphi_{wd}(\tilde{T})}{V} - \frac{r \times E_{humi}}{V \times \rho \times C_p} - Q_{Other} \quad (8)$$

对式(8)进行拉普拉斯变换,初始温度为 T_0 ,假设 $\varphi_{oc}(\tilde{T})$ 和 $\varphi_{wd}(\tilde{T})$ 可以表示为:

$$\varphi_{oc}(\tilde{T}) = a_1(\tilde{T}), \quad (9)$$

$$\varphi_{wd}(\tilde{T}) = a_2(\tilde{T}), \quad (10)$$

式中:

a_1, a_2 ——常数。

整理可得:

$$\bar{T}(s) = \frac{C_p \times m \times P \times \eta_1 \times 3\,000}{L \times V \times \rho} \cdot \frac{1}{s} - \left(\frac{a_1 + a_2}{V} + \frac{r \times E_{humi}}{V \times \rho \times C_p} \right) \cdot \frac{\tilde{T}(s)}{s} + \frac{T_0(s)}{s} - Q_{Other} \quad (11)$$

代入执行设备具体参数以及简化不必要部分,结合温湿度控制滞后延时特点,可近似得出温度控制传递函数。

$$G(s)_T = e^{-60\tau} \frac{0.85}{450s + 1}, \quad (12)$$

式中:

$G(s)_T$ ——温度控制传递函数;

τ ——时间常数。

(2)湿度模型:湿度有绝对湿度和相对湿度,绝对湿度表示单位体积的气体含有水分的质量,相对湿度表示单位空气内的水蒸气分量^[15]。该研究提及湿度均默认为相对湿度。湿度动态方程为:

$$E = E_{humi} - E_{oc} - E_{wd} - E_{other}, \quad (13)$$

式中:

E ——曲房内相对湿度增量,kg/s;

E_{oc} ——加湿器工作的湿度变化,kg/s;

E_{wd} ——使用风机吹风损失的湿度变化,kg/s;

E_{other} ——开窗透风的湿度变化,kg/s;

E_{other} ——其他额外因素导致的湿度损失,kg/s。

系统需要使用加湿器进行加湿,因此需要计算加湿器所产生的湿度,计算式为:

$$E_{humi} = \frac{100 - (100 - H_1)}{\eta_2 W + 1}, \quad (14)$$

式中:

η_2 ——加湿系数,kg/(s·kW);

W ——加湿器功率,kW;

H_1 ——曲房湿度,% RH。

风机开启后,曲房内外气体会发生交换,在曲房内外湿度不同的情况下,曲房中湿度会发生变化,其计算式为:

$$E_{oc} = \varphi_{oc}(H_2), \quad (15)$$

式中:

φ_{oc} ——风机吹风通风量,m³/s;

H_2 ——曲房内外湿度差,% RH。

电窗开启后,窗户区域的气体与外界会发生交换,在曲房内外湿度不同的情况下,曲房中湿度会发生变化,其计算式为:

$$E_{oc} = \varphi_{oc}(H_2), \quad (16)$$

式中:

φ_{oc} ——开窗通风量,m³/s;

H_2 ——曲房内外湿度差,% RH。

经过整理,最终得到曲房的湿度能量平衡方程:

$$\frac{dW_t}{dt} = \frac{100 - (100 - H_1)}{\eta_2 W + 1} - 2\varphi_{oc}(H_2) \quad (17)$$

将式(17)进行拉普拉斯变换,假设初始湿度 $W(0) = W_0$, H_1, H_2 为输入 $H(s)$ 的拉普拉斯变换,整理可得:

$$sW(s) = \frac{H(s)}{\eta_2 W + 1} - 2\varphi_{oc}H(s) + W_0 \quad (18)$$

同理,代入设备具体参数以及简化不必要部分,结合温湿度控制滞后延时特点,可近似得出湿度控制传递函数。

$$G(s)_H = e^{-45\tau} \frac{0.75}{360s + 1}, \quad (19)$$

式中:

$G(s)_H$ ——湿度控制传递函数;

τ ——时间常数。

2 基于 Smith 预估器的模糊 PID 控制器设计

大曲发酵过程的温湿度控制具有滞后性、非线性、分阶段性等特点,传统的 PID 控制无法达到理想的结果^[16]。为实现发酵过程温湿度精准控制,通过 Smith 预估器对发酵过程中的纯滞后环节进行补偿,消除滞后对温湿度控制的不利影响,从而提高系统的响应速度和稳定性。同时结合模糊 PID 控制器,利用模糊逻辑处理温湿度控制中的非线性特性和不确定性,根据发酵过程的温湿度实时偏差和偏差变化率,动态调整 PID 控制器的参数,实现对大曲发酵温湿度的精确控制。基于 Smith 预估器的模糊 PID 大曲发酵过程温湿度控制框架如图 3 所示。

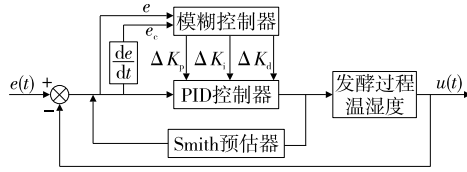


图3 基于 Smith 预估器的模糊 PID 控制原理图

Figure 3 Principle of Smith predictor-based fuzzy PID control

2.1 Smith 预估控制原理

Smith 预估补偿是一种用于解决纯滞后系统控制问题的经典方法。其核心思想是通过引入一个与被控对象动态特性相似的预估器,对系统未来的输出进行预测,从而提前调整控制输入,以削弱纯滞后对系统性能的影响^[17]。

由于大曲发酵控制过程存在纯滞后环节,引入了 Smith 预估器,能够减小或消除系统的滞后环节,从而减小超调量和调节时间,使大曲发酵控制系统快速收敛。系统引入 Smith 预估器的控制系统结构如图 4 所示。

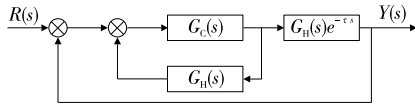


图4 Smith 预估补偿原理图

Figure 4 Principle of Smith predictor compensation

若大曲发酵过程传递函数为

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_o(s)e^{-\tau s}}{1 + G_c(s)G_o(s)e^{-\tau s}} \quad (20)$$

在引入 Smith 预估器后,系统的传递函数转化为:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_o(s)e^{-\tau s}}{1 + G_c(s)G_H(s) + G_c(s)G_o(s)e^{-\tau s}} \quad (21)$$

令 $G_H(s) = G_m(s)(1 - e^{-\tau s})$, 可得到:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_o(s)e^{-\tau s}}{1 + G_c(s)G_m(s) + G_c(s)[G_o(s)e^{-\tau s} - G_m(s)e^{-\tau s}]} \quad (22)$$

在理想情况下,当对象模型已知时,可将 $G_o(s) = G_m(s)$, $\tau = \bar{\tau}$, 此时系统方程变为:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_o(s)}{1 + G_c(s)G_o(s)} e^{-\tau s} \quad (23)$$

由式(23)可以看出经过补偿后系统特征方程不再含有纯滞后环节,且纯滞后环节已推至闭环回路之外,使系统趋于稳定状态。

2.2 模糊 PID 控制器设计

在大曲发酵过程中,温度过高或过低均会抑制微生物

的生长,甚至导致酶失活,影响发酵过程。湿度过高或过低可能会导致微生物受到抑制或死亡。不合适的温湿度可能导致发酵周期延长,发酵产物质量下降^[18],因此精确控制发酵过程中环境温湿度尤其重要。

传统 PID 算法中的 K_p (比例增益)、 K_i (积分增益)、 K_d (微分增益) 参数为常量,不能精确地控制温湿度,而模糊 PID 在控制器的输出计算上使用模糊逻辑,将常量参数替换为模糊参数,这些模糊参数可以通过模糊推理系统进行自适应调节,得到更好的温湿度控制效果^[19]。

以温度控制方面为例,将温度偏差 e_1 、温度偏差率 e_{c1} 作为输入值,模糊 PID 控制参数 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 作为输出值。根据实际情况,温度偏差 e_1 论域为 $[-3, 3]$, 温度偏差率 e_{c1} 论域为 $[-1, 1]$, 对应模糊子集的论域为 $\{-2.5, -1.5, -0.5, 0, 0.5, 1.5, 2.5\}$, 对应的模糊子集语言为 $\{NB$ (负大), NM (负中), NS (负小), ZO (零), PS (正小), PM (正中), PB (正大) $\}$ 。湿度偏差 e_2 论域为 $[-6, 6]$, 湿度偏差率 e_{c2} 论域为 $[-3, 3]$, 对应模糊子集的论域为 $\{-5.5, -3.5, -1.5, 0, 1.5, 3.5, 5.5\}$, 对应的模糊子集语言与温度一样。 K_p 、 K_i 、 K_d 的论域分别定义为 $[0.1, 0.2]$, $[0.1, 0.2]$, $[0.1, 0.2]$ 。选用对噪声和数据波动具有一定的鲁棒性高斯隶属度函数^[20], 即使输入数据存在一定的误差或波动,隶属度的变化也不会过于剧烈,从而提高了系统的稳定性和可靠性。温湿度偏差隶属度函数如图 5 和图 6 所示。

为了实现最优的控制效果,结合专家的实际

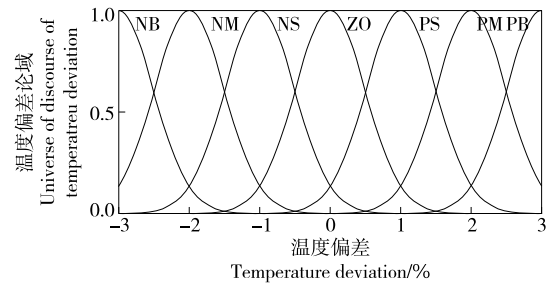


图5 温度隶属度函数

Figure 5 Temperature membership function

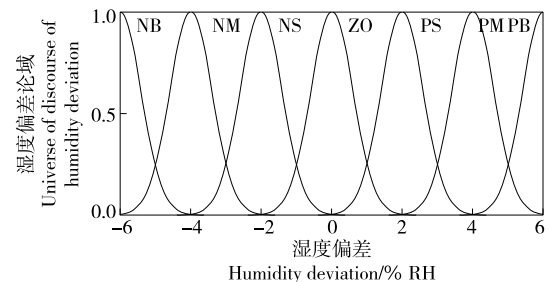


图6 湿度隶属度函数

Figure 6 Humidity membership function

操作经验来构建模糊控制规则表。在选择控制参数时,遵循以下原则:偏差较大时,应优先选择能够迅速减少或消除偏差的控制参数;偏差较小时,应选择适当的调节参数,以防止系统出现超调现象,并确保系统的安全性和稳定性,旨在平衡快速响应和系统稳定性之间的关系^[21]。

根据以上原则,以温湿度控制 $e_1(e_2)$ 、 $e_{c1}(e_{c2})$ 和 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 建立模糊规则表。表1基于偏差 $e_1(e_2)$ 和偏差变化率 $e_{c1}(e_{c2})$ 来动态调整PID控制器的参数 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 。

(1) 模糊化过程:将偏差和偏差变化率通过隶属度函数转换为模糊集合。例如, e_1 和 e_{c1} 均可被转换为“负大

(NB)”“负小(NS)”“零(ZO)”“正小(PS)”“正大(PB)”等。

(2) 模糊规则应用:根据偏差和偏差变化率模糊集合确定 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的模糊集合。例如:IF e_1 is NB and e_{c1} is NB, then $\Delta K_p=PB, \Delta K_i=NB, \Delta K_d=PS$, e_2 和 e_{c2} 同理。

(3) 模糊推理和解模糊化:通过模糊逻辑运算(如AND、OR)组合模糊规则的结果,然后通过解模糊化过程(如重心法)将模糊的控制参数集合转换为精确的数值,即调整后的 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 。

(4) 控制参数调整:将调整后的 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 加到初始的PID参数上,得到新的PID参数,用于控制系统的输出。

表1 模糊规则表
Table 1 Fuzzy rules

e_1/e_2	e_{c1}/e_{c2}						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/PS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/ZO/ZO
NS	PM/NB/ZO	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
ZO	PM/NM/ZO	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZO
PS	PS/NM/ZO	PS/NS/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO
PM	PS/ZO/PB	ZO/ZO/NS	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
PB	ZO/ZO/PB	ZO/ZO/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

3 仿真与试验

为验证上述控制器的控制效果,在Simulink中搭建相应的仿真模型,以式(12)和式(19)简化的大曲发酵过程温湿度控制传递函数作为被控对象。首先不断调整初始PID控制器参数,得到最好控制效果条件下温度的 K_{pt} 、 K_{it} 、 K_{dt} 参数值($K_{pt}=7.5$ 、 $K_{it}=0.045$ 、 $K_{dt}=100$),以及湿度 K_{ph} 、 K_{ih} 、 K_{dh} 参数值($K_{ph}=8.5$ 、 $K_{ih}=0.065$ 、 $K_{dh}=100$),并后续保持不变。分别搭建PID控制器、模糊PID控制器、

Smith模糊PID控制器对被控对象进行仿真试验。

3.1 仿真模型建立

考虑到大曲实际发酵过程温湿度需要长时间维持在55℃以及80% RH左右,结合试验场地实际情况,温度控制仿真模型设定初始值为20℃,期望值为60℃,湿度控制仿真模型设定初始值为40% RH,期望值为80% RH。观察3种控制器下,通过对比阶跃响应曲线比较3种控制器性能。基于Smith预估器模糊PID控制的大曲温湿度仿真模型如图7和图8所示。

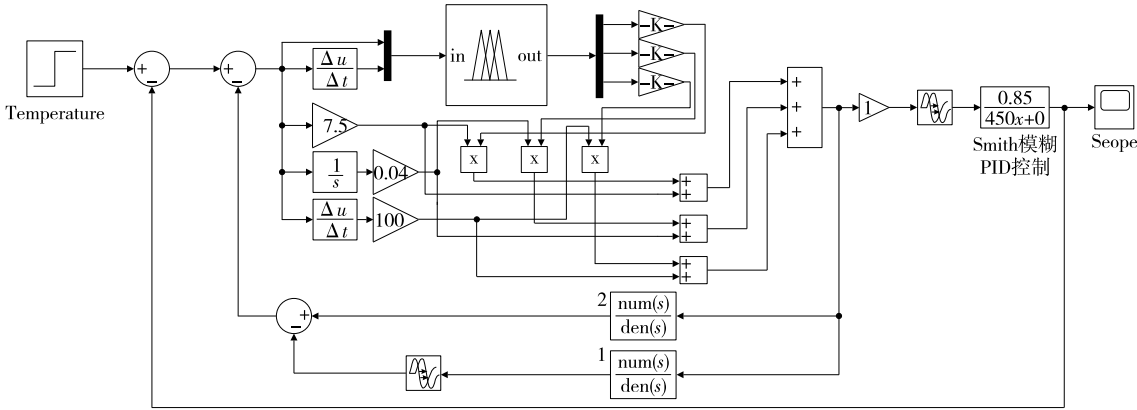


图7 大曲发酵温度控制仿真模型

Figure 7 Simulation model for Daqu fermentation temperature control

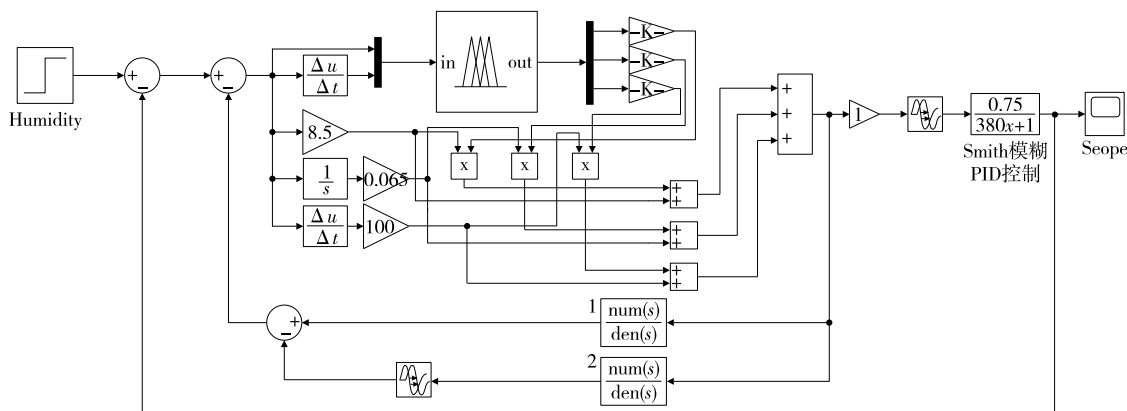


图 8 大曲发酵湿度控制仿真模型

Figure 8 Simulation model for Daqu fermentation humidity control

3.2 仿真结果对比

由图 9~图 10 可知,3 种控制方法均能最终将温湿度控制在目标范围内,且使用的基于 Smith 预估器的模糊 PID 控制明显优于传统的 PID 控制以及模糊 PID 控制。

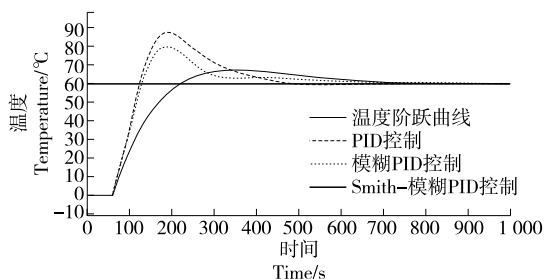


图 9 温度控制仿真结果对比

Figure 9 Comparison of temperature control simulation results

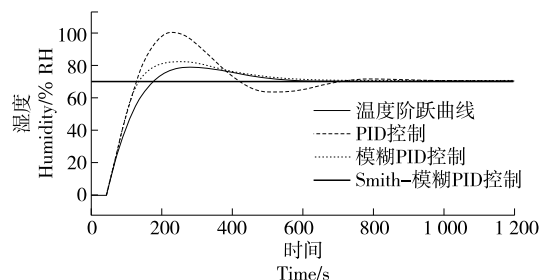


图 10 湿度控制仿真结果对比

Figure 10 Comparison of humidity control simulation results

使用 Simulink 自带的工具可以得到每条曲线相应的峰值、调节时间和超调量,结果见表 2。

根据控制系统的评价标准可知,控制系统超调量小,系统稳定性越好;趋稳时间短,系统响应速度快。温度方面,Smith-模糊 PID 控制的调节时间比 PID 控制和模糊 PID 控制分别缩短了 15.81% 和 11.53%,超调量大幅下降至 10.3%。湿度方面,Smith-模糊 PID 控制的调节时间比

表 2 仿真指标结果

Table 2 Simulation parameter results

控制方法	温度		湿度	
	调节时间/s	超调量/%	调节时间/s	超调量/%
PID	917	38.3	1 001	42.8
模糊 PID	861	15.0	858	17.1
Smith-模糊 PID	772	10.3	655	11.4

PID 控制和模糊 PID 控制分别缩短了 34.57% 和 23.66%,超调量下降至 11.4%。综合对比显示,基于 Smith-模糊 PID 控制能获得更好的控制效果,调节时间更短,基本可以满足大曲发酵过程温湿度控制的要求。

3.3 试验验证与结果分析

为验证试验设计的基于 Smith 预估器的模糊 PID 智能调控方法的正确性与实用性,进行曲房大曲发酵试验,并给定大曲发酵目标温湿度曲线,在曲房上、中、下 3 层每层分别均匀布置 5 个环境温湿度传感器,每 5 min 采集一次曲房的环境温湿度数据,试验周期为传统大曲完成发酵时间。最终对比模糊 PID 与 Smith-模糊 PID 控制下曲房环境 3 层平均温湿度曲线与目标温湿度曲线的拟合程度。

由图 12(a)可知,发酵开始前 6 d,模糊 PID 和 Smith-模糊 PID 均较接近目标温度,Smith-模糊 PID 控制的响应速度略快于模糊 PID。发酵中期,温度维持在最高水平,此区间模糊 PID 控制温度与目标温度最大差值约为 4.2 °C,且因滞后影响始终达不到对应时间段温度要求。而 Smith-模糊 PID 控制温度与目标温度最大差值约为 1.8 °C,且其余时间段基本吻合,合理解决了曲房滞后调节问题。发酵后期(后 15 d),温度开始逐渐下降,模糊 PID 控制仍存在滞后性问题。整个过程中,Smith-模糊 PID 控

制的温度波动最小,更接近目标温度曲线,显示出更好的稳定性和控制精度。模糊PID控制的温度波动稍大,尤其是在温度上升时显示出对温度变化的响应不如Smith-模糊PID控制平滑。

由图 12(b)可知,发酵前期,两种控制方式与目标湿度基本吻合,发酵 7 d 后,曲房环境温度上升,环境湿度开始逐渐下降,湿度达到第 1 个极小值,此区间模糊PID控制湿度与目标湿度最大差值约为 6.2% RH,而Smith-模糊

PID控制湿度与目标湿度最大差值约为 2.3% RH。发酵后期(后 15 d),湿度达到第 2 个极小值,此时模糊PID控制湿度与目标湿度最大差值约为 5.1% RH,而Smith-模糊PID控制湿度与目标湿度最大差值约为 2.6% RH,直到发酵结束,Smith-模糊PID控制湿度下降速度和目标湿度曲线更为一致。整个湿度控制过程可明显看出模糊PID受滞后性调控影响较大,而Smith-模糊PID控制明显处于优势。

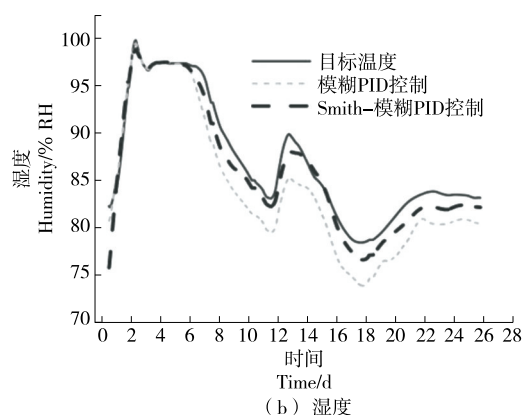
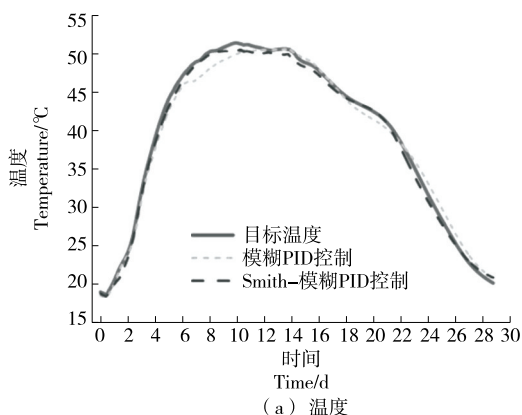


图 11 温湿度试验发酵曲线对比

Figure 11 Comparison of fermentation curves at experimental temperature and humidity

图 12 为两种控制方法下温湿度与目标温湿度之间的误差随发酵时间的变化趋势,其中误差带由误差值的标准差(σ)界定。由图 12(a)可知,模糊PID控制的温度误差带较宽,其在温度控制上存在显著波动,误差范围较大,误差分布长时间在 $\pm 2^\circ\text{C}$ 波动,尤其是发酵后期(20~30 d),误差波动明显。Smith-模糊PID控制的误差带较窄,实际平均温度紧密围绕目标值波动,大多数误差集中在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 左右,其在温度控制上更为稳定,误差分布均匀,没有太多明显的偏移或趋势,温度控制均匀性得到了提

高。由图 12(b)可知,模糊PID湿度控制的误差范围在发酵前期(0~10 d),误差在 $\pm 6\%$ 波动,控制效果不稳定,且整体误差带较宽,控制上存在较大误差。Smith-模糊PID湿度控制整体误差带较窄,误差范围和误差波动小,误差分布较均匀,集中在 $\pm 2\%$,表明其在控制发酵湿度的稳定性、均匀性方面表现较好。

同时对误差分布进行了统计显著性检验,两种控制方法下误差数据均为非正态,采用Mann-Whitney U检验,温度方面,在 0.05 的显著水平下模糊PID控制误差的中位

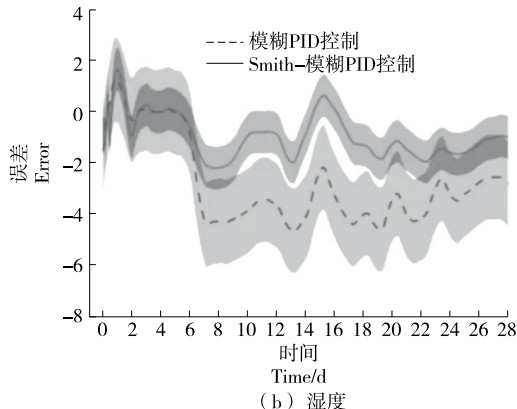
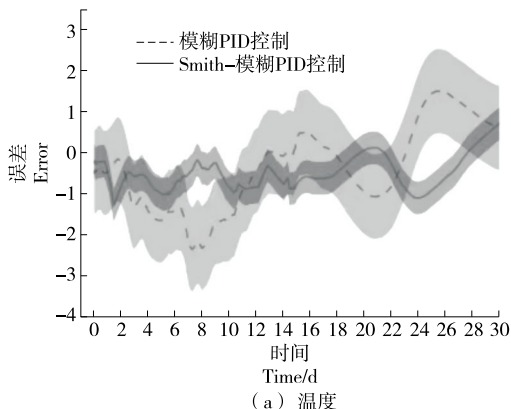


图 12 温湿度误差带图

Figure 12 Error band of temperature and humidity

数和总秩和约为 $-0.571\ 2$ 和 $1.805\ 35 \times 10^7$, Smith-模糊 PID 控制误差的中位数和总秩和约为 $-0.379\ 6$ 和 $1.927\ 56 \times 10^7$ 。根据中位数和总秩和的比较, Smith-模糊 PID 控制在统计上表现更好, 其中位数更接近于 0, 且总秩和较大, 表明其误差分布更倾向于较小的误差值, 从而更接近目标温度。湿度方面, 在 0.05 的显著水平下模糊 PID 控制误差的中位数和总秩和约为 $-3.424\ 8$ 和 $3.352\ 34 \times 10^7$, Smith-模糊 PID 控制误差的中位数和总秩和约为 $-1.153\ 78$ 和 $6.451\ 16 \times 10^7$, 同理, Smith-模糊 PID 控制表现更优。

综上, Smith-模糊 PID 控制明显优于模糊 PID 控制, Smith-模糊 PID 控制在温湿度控制中表现出更好的滞后响应, 在控制发酵温湿度的均匀性方面表现较好, 表明 Smith 预估器的引入有效改善了模糊 PID 控制的性能, 使其更适合于复杂的温湿度控制需求, 基本验证了仿真试验结果。

4 结论

针对传统控制方法在大曲发酵过程中的不足之处, 设计了一种基于 Smith 预估器的模糊 PID 温湿度控制器, 并将其与传统的 PID 控制和模糊 PID 控制进行了仿真对比。结果表明, Smith-模糊 PID 控制温度超调量分别降低了 23.3% 和 4.7%, 调节时间分别缩短了 15.81% 和 11.53%, 湿度超调量分别降低了 31.4% 和 5.7%, 调节时间分别缩短了 34.57% 和 23.66%。Smith-模糊 PID 控制温湿度与目标温湿度曲线在整个发酵过程环境控制中, 温度最大偏差 $\leq 2\ ^\circ\text{C}$, 湿度最大偏差 $\leq 3\%\ \text{RH}$, 平均温湿度误差带稳定在 $\pm 1\ ^\circ\text{C}$ 和 $\pm 2\%\ \text{RH}$, 比同条件下模糊 PID 控制窄, 温湿度紧密围绕目标值波动, 控制稳定性高、均匀性好。综上, Smith-模糊 PID 控制器能够有效解决大曲发酵温湿度控制滞后性、非线性问题以及提高大曲发酵温湿度控制的稳定性和均匀性。后续可围绕温湿度耦合建模与分布式 MPC、强化学习自优化模糊规则、执行器抗饱和及数字孪生实验验证展开, 以解决空间不均匀、大扰动适应性和长期漂移问题, 推动 Smith-模糊 PID 策略在大曲发酵产业化环境中的落地应用。

参考文献

- [1] 徐钦祥, 孟卫东, 陈斌, 等. 口子大曲生产过程中数字化管控系统的应用[J]. 酿酒科技, 2019(2): 96-100.
XU Q X, MENG W D, CHEN B, et al. Application of digital management system in the production process of kouzi daqu[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2019(2): 96-100.
- [2] 白云松, 田建平, 黄海飞, 等. 大曲发酵过程中曲房环境温度的数值分析[J]. 中国酿造, 2019, 38(11): 165-169.
BAI Y S, TIAN J P, HUANG H F, et al. Numerical analysis of

- ambient temperature during Daqu fermentation[J]. China Brewing, 2019, 38(11): 165-169.
- [3] 皇甫姗姗, 朱节中, 杨再强, 等. 中国温室环境控制研究进展[J]. 中国农学通报, 2021, 37(27): 125-131.
HUANGFU S S, ZHU J Z, YANG Z Q, et al. The environmental control of greenhouse in China: research progress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(27): 125-131.
- [4] 史志明, 孙聪, 曹亮, 等. 智能温室环境控制的研究概况[J]. 现代农业研究, 2018, 24(12): 37-38.
SHI Z M, SUN C, CAO L, et al. Overview of research on environmental control of intelligent greenhouse[J]. Modern Agricultural Research, 2018, 24(12): 37-38.
- [5] 孙力帆, 张雅媛, 郑国强, 等. 基于 D-S 证据理论的智能温室环境控制决策融合方法[J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 268-275.
SUN L F, ZHANG Y Y, ZHENG G Q, et al. Approach to decision fusion for intelligent greenhouse environmental control based on D-S evidence theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 268-275.
- [6] HAMIDANE H, EL FAIZ S, RKIK I, et al. Constrained temperature and relative humidity predictive control: Agricultural greenhouse case of study[J]. Information Processing in Agriculture, 2024, 11(3): 409-420.
- [7] AGUSTIANTO K, WARDANA R, DESTARIANTO P, et al. Development of automatic temperature and humidity control system in kumbung (oyster mushroom) using fuzzy logic controller[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 672(1): 012090.
- [8] FURIZAL F, SUNARDI S, YUDHANA A. Temperature and humidity control system with air conditioner based on fuzzy logic and internet of things[J]. Journal of Robotics and Control (JRC), 2023, 4(3): 308-322.
- [9] 刘洪朋, 林毓梁, 田中才, 等. 基于模糊控制算法的智能风帘系统设计[J]. 食品与机械, 2023, 39(12): 88-91.
LIU H P, LIN Y L, TIAN Z C, et al. Design of intelligent air screen system based on fuzzy control algorithm[J]. Food & Machinery, 2023, 39(12): 88-91.
- [10] 刘向勇, 高雪飞, 董强, 等. 用于食品冷冻温度控制的模糊控制系统设计[J]. 食品与机械, 2023, 39(11): 116-124.
LIU X Y, GAO X F, DONG Q, et al. The design of fuzzy control system for food freezing temperature control[J]. Food & Machinery, 2023, 39(11): 116-124.
- [11] 周书宇, 田建平, 高剑, 等. 大曲发酵过程的环境温湿度均匀性调控系统研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(18): 148-156.
ZHOU S Y, TIAN J P, GAO J, et al. Study on regulating system of ambient temperature and humidity uniformity in Daqu fermentation process[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(18): 148-156.

- [12] 朱志祥, 王学庆, 李旭, 等. 基于 Smith 预估和遗传算法的低温场神经网络控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2025(1): 190-194, 200.
- ZHU Z X, WANG X Q, LI X, et al. Neural network control of low temperature field based on Smith predictor and genetic algorithm[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2025(1): 190-194, 200.
- [13] 汪智求, 陈偲, 任智, 等. 模糊 PID 在红外测温系统中的应用与研究[J]. 机械设计与制造, 2025(9): 119-122.
- WANG Z Q, CHEN C, REN Z, et al. Application and research of fuzzy PID in infrared temperature measuring system[J]. Machinery Design & Manufacture, 2025(9): 119-122.
- [14] GIERENS K, SCHUMANN U, HELTEN M, et al. A distribution law for relative humidity in the upper troposphere and lower stratosphere derived from three years of MOZAIC measurements[J]. Annales Geophysicae, 1999, 17(9): 1 218-1 226.
- [15] LIU R, LI M, GUZMÁN J L, et al. A fast and practical one-dimensional transient model for greenhouse temperature and humidity[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 186: 106186.
- [16] 郭佳, 徐兴洋, 张佳兴, 等. 基于 MATLAB 的 PID 控制和模糊控制比较[J]. 工程机械, 2025, 56(5): 67-72, 10.
- GUO J, XU X Y, ZHANG J X, et al. Comparison of PID control and fuzzy control based on MATLAB[J]. Construction Machinery and Equipment, 2025, 56(5): 67-72, 10.
- [17] 赵月林, 马征, 孙壮. 考虑舵机时滞的船舶航向控制系统研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(12): 124-129.
- ZHAO Y L, MA Z, SUN Z. Ship heading control system considering time delay of steering gear[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2020, 39(12): 124-129.
- [18] 潘玲玲, 罗明有, 王媚, 等. 发酵温度对浓香型白酒杂醇油含量的影响[J]. 中国酿造, 2021, 40(3): 106-110.
- PAN L L, LUO M Y, WANG M, et al. Effect of fermentation temperature on fusel oil content in strong-flavor Baijiu[J]. China Brewing, 2021, 40(3): 106-110.
- [19] 简睿, 彭莉. 绣片柜模糊 PID 温湿度控制系统[J]. 软件工程, 2024, 27(6): 74-78.
- JIAN R, PENG L. Fuzzy PID temperature and humidity control system for embroider patch cabinet[J]. Software Engineering, 2024, 27(6): 74-78.
- [20] 吴春华, 俞薛颖, 李智华, 等. 基于 FCM 与高斯隶属度的光伏组件健康状态诊断[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1 887-1 896.
- WU C H, YU X Y, LI Z H, et al. Health state diagnosis of photovoltaic modules based on FCM and Gaussian membership[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1 887-1 896.
- [21] 刘伟. 基于模糊神经网络的啤酒灌装精度控制技术[J]. 食品与机械, 2022, 38(4): 104-108.
- LIU W. Beer filling precision control technology based on fuzzy neural network[J]. Food & Machinery, 2022, 38(4): 104-108.